

УДК 669.536

**В. И. Матюхин, Ю. Г. Ярошенко, С. Я. Журавлев, Е. А. Морозова,
А. В. Матюхина**

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», г. Екатеринбург, Россия

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИРОДНОГО ГАЗА В ШАХТНЫХ ПЕЧАХ ВАГРАНОЧНОГО ТИПА

Аннотация

При фурменной подаче воздушного дутья и соосной струйной подаче газообразного топлива под повышенным давлением при наличии на пути струй газопроницаемой насадки более мощный газовый поток (природный газ), вытекающей из сопла с высокой скоростью во внешнюю среду создает условия для эжектирования воздушного потока, который перемешиваясь с газом в присутствии источника воспламенения формирует высокотемпературную зону различной протяженности.

Ключевые слова: шахтная печь, природный газ, распределение температур в печи: вблизи газового сопла, по радиусу печи, по периметру печи, расход условного топлива.

Absract

At furmenny giving of air blasting and coaxial jet supply of gaseous fuel under elevated pressure in the presence on the way of streams of the gas-permeable nozzle more powerful gas stream (natural gas) following from a nozzle with a high speed to the external environment creates conditions for ejection of an air flow which mixing up with gas in the presence of a source of ignition forms a high-temperature zone of various extent.

Key words: the mine furnace, natural gas, distribution of temperatures in the furnace: near a gas nozzle, on furnace radius, on furnace perimeter, a consumption of conditional fuel.

В технологиях черной и цветной металлургии, стройиндустрии, химической отрасли, энергетике и др. используется значительное количество рудных и нерудных материалов различного минералогического и гранулометрического составов. Для получения конечного продукта требуемого качества значительную их часть подвергают тепловой обработке с целью осуществления необходимых преобразований. Для этого используют шахтные печи различного типа, работающих в режиме плотного слоя кусковых материалов. От степени завершенности тепловых процессов в них в существенной мере зависят технико-экономические показатели всего производства.

Обычно источниками тепловой энергии в шахтных печах является твердое топливо – кокс, уголь или их комбинация с природным газом. Использование слоевого способа сжигания природного газа непосредственно в плотном слое нагреваемых материалов является одним из направлений повышения эффективности нагрева кусковых материалов, а в некоторых технологиях и их плавления.

В этих условиях практика эксплуатации шахтных печей различного типа основывается на закономерностях развития процессов тепло-массообмена и

газодинамики [1] и основным принципом - чем лучше контакт газа и материалов между собой при их движении, тем эффективнее процесс теплопередачи между ними. Для реализации такой технологии необходимо обеспечить развитие двух параллельных процессов: *подготовительного*, при котором происходит формирование исходной газо-воздушной смеси и подогрев ее до температуры воспламенения, и *основного*, в течение которого происходит слоевое горение газообразного топлива.

В лабораторных и в промышленных условиях работы слоевых установок и шахтных печей [2] была установлена возможность сжигания природного газа в плотном слое кусковых материалов практически любого химического состава с коэффициентом расхода воздуха как большим, так и меньшим единицы. Поскольку процесс горения газа протекает внутри слоя, вне контакта с футеровкой агрегата, то при этом снижаются его общие тепловые потери.

При фурменной подаче воздушного дутья и соосной струйной подаче газообразного топлива под повышенным давлением и наличии на пути струй газопроницаемой насадки кусковых материалов характер движения газовых потоков практически не изменяется [3]. Согласно теории развития турбулентных одиночных и соосных струй, поток более мощной среды (природный газ), вытекающий из сопла с высокой скоростью во внешнюю среду, воздух которой движется с меньшей скоростью, создает условия для эжектирования воздушного потока. Поскольку внутри газовой струи нет среды для удовлетворения ее эжектирующих потребностей, то давление в этой зоне падает. Внутри кольцевого пространства между потоками формируется зона горения (рис. 1), на внутренней и внешней стороне которой возникают циркуляционные вихри, направленные вдоль оси струи к соплу [4], улучшающие стабильность воспламенения газо-воздушной смеси.

При распространении двух коаксиальных струй: центральной – природного газа, и кольцевой – воздуха для горения, образуются два циркуляционных вихря по обе стороны зоны образования газо-воздушной смеси и горения (рис. 1).

Значительная дальнобойность турбулентных струй при повышенных давлениях газовой среды, а также возможность достаточного полного перемешивания встречающихся в пограничном слое газовых сред открывает возможность формирования газо-воздушной смеси заданного состава вдоль фронта факельного процесса движения общей газовой струи, образующегося у среза фурм. Распространение этого фронта в глубину слоя шихты определяется преимущественно условиями движения центральной газовой струи, особенностями ее распространения в слое и степенью перемешивания с коаксиальным потоком воздуха.

В основе слоевого способа сжигания природного газа лежат явления адсорбции молекул кислорода на поверхности твердых компонентов слоя [5]. В результате количество кислорода в газовой смеси вблизи источника воспламенения сокращается, затрудняя воспламенение и горение газа. Сам процесс горения осуществляется в зоне протяженностью не менее 40-60 мм [6]. Поэтому одно из условий организации режима горения газа в слое шихты заключается в использовании воздуха, количество которого лежит выше

значений коэффициента расхода воздуха – $\alpha = 2,0-2,5$. После подогрева адсорбированного кислорода до величины активации, его молекулы десорбируют, вовлекаются в процесс горения, распространяя процесс генерации тепла на удаленные от среза фурм слои компонентов шихты. В итоге происходит увеличение протяженности зоны горения. При повышении скорости потока газа процесс перемешивания и горения газовых компонентов (метана, этана и пропана) и воздуха интенсифицируется при сокращении ширины зоны горения.

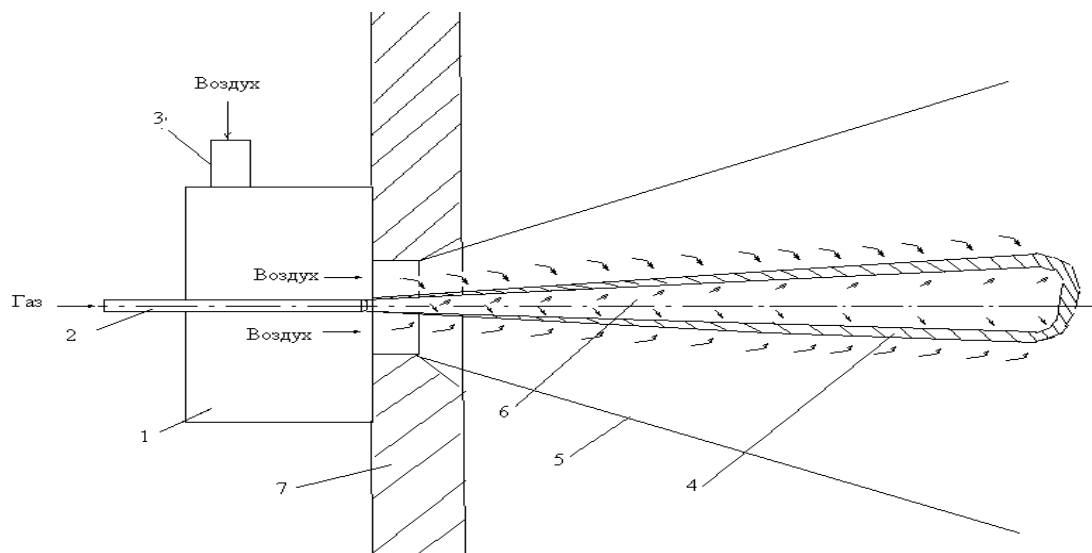


Рис. 1. Схема развития процесса сжигания газа в слое при струйной подаче газовых компонентов: 1 – корпус горелки; 2 – газовое сопло; 3 – воздушный патрубок; 4 – зона образования газовойоздушной смеси и горения; 5 – воздушная струя; 6 – газовая струя; 7 – корпус печи

Для воспламенения газового потока в слое необходимо обеспечить его предварительный подогрев, как минимум, до температуры 800-1050 °С [7]. Источник воспламенения должен располагаться вблизи среза сопла на выходе газовых струй в нагреваемый слой, что обеспечивается в результате факельного разогрева продуктами полного горения газа слоя шихты, движущегося сверху. Чем ближе к срезу сопла располагается зона воспламенения газо-воздушной смеси, тем лучше достигается равномерное распределение температуры горящего факела вдоль его длины. При этом протяженность предварительной зоны обеспечивает разогрев газо-воздушной смеси до температуры воспламенения, при которой тепловыделения превышают теплопоглощение в слое.

Условия подогрева исходной газо-воздушной смеси на участке выхода природного газа в слой зависят от массовой скорости газов, условий перемешивания и уровня разогрева участка слоя, прилегающего к срезу газового сопла. После нагрева слоя шихты до заданной температуры достигается стабильный режим сжигания природного газа в слое шихты.

Исследование технологических возможностей слоевого сжигания природного газа было осуществлено на шахтной печи обжига известняка, диаметр рабочего пространства которой равен 3 м. Подачу природного газа через

фурму шахтной печи иллюстрирует рис. 1. Горелочное устройство типа ГП для реализации процесса обжига известняка представляет собой металлическую конструкцию – 1 с центральным газовым соплом – 2, через которую подавался холодный природный газ с давлением около 3,0 атмосферы и тангенциальным подводом вентиляторного воздуха – 3, через выходное сопло горелки диаметром 426 мм с температурой около 360 °С. Для изучения особенностей изменения температурного поля в обжигаемом слое в отапливаемой зоне печи через гляделку одной из используемых горелок устанавливали металлическую трубу с внутренним диаметром 15 мм, которую перемещали по слою в горизонтальном направлении. Место ввода зонда выбиралось на расстоянии примерно 80 мм от внутренней стенки центральной трубы горелки. Перемещение зонда распространялось вглубь слоя на расстояние до 1600 мм с интервалом между измерениями тепловых и химических параметров печной среды 200 мм. Для измерения температуры слоя в точке измерения использовали термопару – ТХА, установленную в металлическом зонде. Исследования выполнялись в режиме слоевого сжигания природного газа при коэффициенте расхода воздуха 1,52 и скорости выхода газов из горелки 2,97 м/с.

Анализ этих результатов (рис. 2, а) показал, что температурное поле слоя в этой области отличается существенной неравномерностью с максимумом температуры в районе первого квадранта. Это связано в первую очередь с распределением воздушного потока, который при движении по вращательной траектории (тангенциальный подвод) охлаждает слой известняка в нижней части выходного патрубка горелки и снижает температурные условия его разогрева. По мере удаления места измерения от среза носика горелки (рис. 2, б) происходит постепенное увеличение температуры слоя, а на расстоянии 200 мм наблюдается стабилизация ее значений на уровне 1200-1400 °С. Протяженность этой зоны в слое определяет ширину зоны горения природного газа.

По результатам экспериментального зондирования отапливаемой зоны шахтной печи для обжига известняка в режиме слоевого способа сжигания природного газа были также установлены закономерности изменения температурного поля обжигаемого слоя (рис. 2, б). Эти исследования отражают изменение температуры в горизонтальном направлении (параллельно оси горелки в точке Т (рис. 2, а)). На их основе установлено, что по мере удаления в слой шихты от среза сопла горелки происходит повышение температуры и на расстоянии примерно 200 мм наблюдается первый максимум, равный 1200 °С, а на расстоянии около 800 мм располагается второй максимум температуры – 1400 °С, определяющий протяженность высокотемпературной зоны. Если считать (на основании опыта слоевого сжигания газа [3]) температуру воспламенения газа в слое 1050 °С, то глубина формирования зоны горения – $H_{зг}$, в исследуемом месте составляет около 110 мм.

В рабочем пространстве печи между горелочными устройствами существуют ограниченные зоны (рис. 3) объемом примерно 0,024 м³ (конус диаметром 0,9 м и высотой около 350 мм), в которых наблюдаются пониженные температуры (около 1000 °С). При этом на расстоянии около 1000 мм от

внутренней стенки печи обеспечивается средняя температура обжига около 1200 °С.

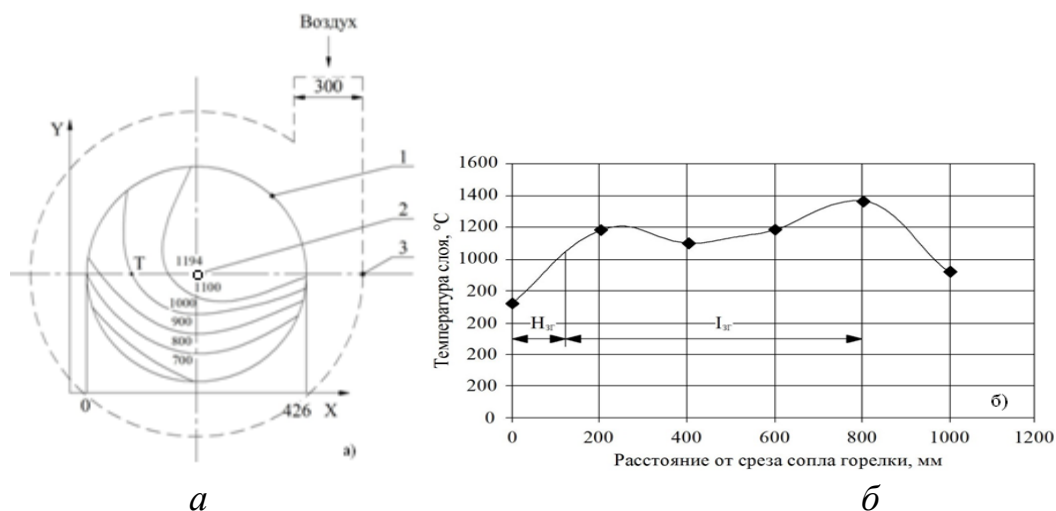


Рис. 2. Изменение температурного поля (цифры у кривых, °С):
 а – на срезе ввода природного газа: 1 – выходное сопло горелки диаметром 426 мм; 2 – газовое сопло; 3 – корпус горелки; Т – точка зондирования температурного поля; б – по длине газового факела: $H_{зг}$ – глубина формирования высокотемпературной зоны горения; $L_{зг}$ – протяженность зоны горения в направлении зондирования

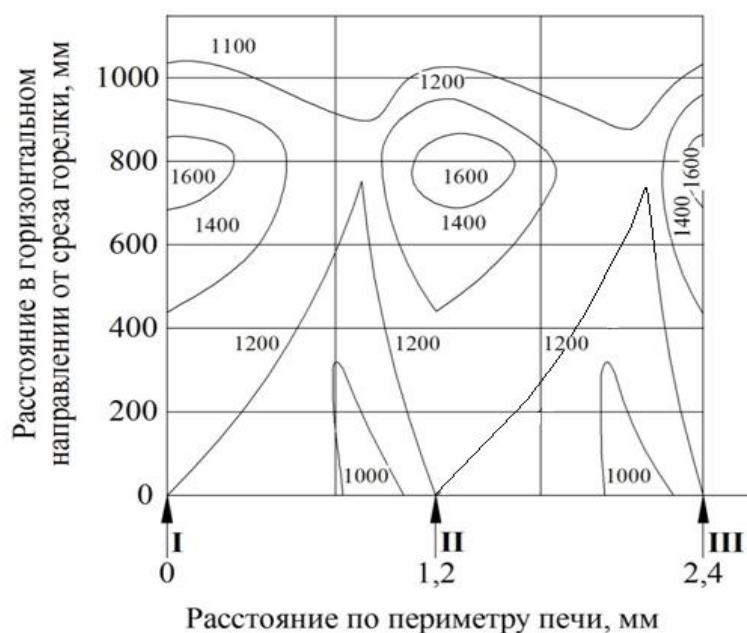


Рис. 3. Изменение температурного поля в слое известняка в горизонтальном направлении (цифры у кривых – температура слоя, °С) в отапливаемой зоне шахтной печи. I, II, III – места установки горелочных устройств

Изменение температурных условий обжига кусковых материалов и протяженность распространения зоны высокотемпературной теплогенерации можно осуществлять, варьируя скорость выхода газо-воздушной смеси из

горелочного устройства, соотношение между массовыми потоками газа и воздуха, а также условиями перемешивания используемых газовых сред.

Таким образом, использование слоевого способа сжигания природного газа является эффективным и безопасным способом управления режимом слоевого обжига кусковых материалов с возможностью изменения уровня максимальных температур в широком диапазоне в пределах от 1100 до 1600 °С при протяженности высокотемпературной зоны в пределах до 2000 мм.

Сжигание природного газа в плотном слое кускового материала шахтной печи позволяет обеспечить:

- сохранение температурно-временных условий в шахтной печи для протекания технологических процессов получения качественного продукта – извести;
- выполнение технологических требований к качеству обожженного продукта;
- снижение удельного расхода топлива;
- снижение вредных выбросов парниковых газов в окружающую среду.

Список использованных источников

1. Телегин А.С., Швыдкий В.С., Ярошенко Ю.Г. Тепломассоперенос / Под ред. Ю.Г. Ярошенко. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. – 455 с.
2. Лисиенко В.Г., Лобанов В.И., Китаев Б.И. Теплофизика металлургических процессов. – М.: Металлургия, 1982. – 240 с.
3. Швыдкий В.С. Механика жидкости и газов / В.С. Швыдкий, Ю.Г. Ярошенко, Я.М. Гордон [и др.]; под ред. В.С. Швыдкого. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2003. – 464 с.
4. Абрамович Г.Н. Прикладная газовая динамика. – М.: Наука: Гл. ред. физ.-мат. лит., 1991. – 690 с.
5. Кноре Г.Ф., Палеев И.И. Теория топочных процессов / Под ред. Г.Ф. Кноре. – М., -Л.: Энергия, 1966. – 491 с.
6. Матюхин В.И. Исследование условий формирования зоны горения газа в слое железорудных окатышей / В.И. Матюхин, В.И. Лобанов, Я.М. Гордон // Известия вузов. Черная металлургия. 1982, № 11. – С. 18-21.
7. Матюхин В.И. Исследование условий формирования зоны горения природного газа в слое железорудных окатышей для улучшения их металлургических свойств / В.И. Матюхин, В.И. Лобанов, Ю.Г. Ярошенко // Известия вузов. Черная металлургия. 1987. № 6. – С. 103-104.